독립 구동 굴절차량의 회전반경 감소를 위한 토크분배 알고리즘

Torque Distribution Algorithm of Independent Drive Articulated Vehicle for Small Radius Turning Performance

이기범* · 황가람 · 탁준영 · 서인수

Kibeom Lee · Karam Hwang · Junyoung Tak · In-Soo Suh

Abstract The articulated structures seen in train or tram applications are being applied in road transportation systems, for use in mass passenger transit. When articulated vehicles are driven on public roads, they no longer follow a guided track. Therefore, there are a lot of control elements that need to be considered, such as turning radius, swept path width, off-tracking, and swing-out. Some of the currently available articulated vehicles on roads are equipped with an independent drive system; a system that has one motor at each wheel. Through this drive system, each wheel can be independently controlled, making precise and quick dynamic stability control possible. In this paper, we propose a torque distribution algorithm that can reduce the overall turning radius of the articulated vehicle, which has been verified through dynamic simulation.

Keywords : Articulated vehicle, Bimodal tram, Electric differential, Torque distribution

초 록 기차나 군용 트럭 등에 이용되던 굴절차량이 승객의 대량 수송을 위하여 일반 도로에 적용이 검토되고 있다. 레일을 따라가지 않고 일반 도로에서 주행하는 굴절차량은 회전반경, 차량 선회 폭, 이탈계적, 스윙아웃 등 다양한 제어 요소를 갖는다. 현재 승객 수송을 목적으로 제작되는 굴절차량은 각 바퀴에 하나의 모터를 장착하고 구동하는 독립 구동 방식을 채택하고 있으며, 각 바퀴의 독립 제어를 통하여 차량의 빠르고 정확한 자세 제어가 가능하다. 이 논문에서는 여러 제어 요소 중 굴절차량의 최초 목적인 회전반경 감소를 위한 토크 분배 알고리즘을 제안하고, 시뮬레이션을 통하여 회전 반경이 감소함을 검증하였다.

주요어 : 굴절차량, 바이모달 트램, 전자식 차동장치, 구동력 분배

1. 서 론

1.1 굴절차량 현황

굴절차량은 차량의 회전 성능의 향상을 위하여 차량의 중간에 회전 관절이 장착되어 있는 차량을 의미한다. 이러한 굴절차량은 일반적으로 높은 수송능력을 목적으로 하며 굴절 구조로 인하여 제어가 어렵기 때문에 기차, 트램 등 궤도를 따라 주행하는 차량에 사용 되어 왔다.

최근 환경문제로 인하여 기존 교통수단을 대체할 친환경 교통 수단 들이 개발되고 있으며, 그 중 하나로 굴절차량의 일반 도로 적용이 검토되고 있다. 이러한 차량은 일반 도로를 주행하기 때문에 높은 운영 유연성을 가지며 경전철 등 다른 교통수단 보다 건설 비용이 저렴하다. 또한 큰 수송 수요에 대응이 용이하다는 장점이 있다[1,2].

반면 고무 차륜을 통하여 구동이 되므로 주행 중 노면의 영향을 받을 수 있다는 단점이 있고, 전용 궤도를 달리지 않고 일반 도로를 주행할 수 있기 때문에 다른 차량과의 간

섭을 피해야 하는 등 차량의 정밀한 제어가 필요하다. 또한 기존의 차량보다 큰 회전반경과 차량 선회 폭을 갖기 때문에, 도로의 확폭과 전용 도로 설계가 필요하다는 단점이 있다. 이러한 단점을 최소화 하기 위하여 능동적으로 토크를 분배하여 최소 회전반경을 줄이는 알고리즘을 제안하고자 한다.

현재 승객 수송을 목적으로 개발된 굴절차량은 Fig. 1과 같이 한국철도기술연구원(KRRI: Korea Railroad Research Institute)의 바이모달 트램과, APTS사의 Phileas 등이 있다 [3].

이 논문에서는 고무차륜을 이용하여 일반 도로를 주행하는 굴절차량의 제어 요소들에 대하여 소개한다. 굴절차량의

Fig. 1 Articulated vehicle, Bimodal tram by KRRI (left) and Phileas by APTS (right)

*Corresponding author.

Tel.: +82-42-350-1281, E-mail : kibeom.lee@kaist.ac.kr

©The Korean Society for Railway 2014

http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.5.336

제어 요소 중 굴절차량의 궁극적 목적인 회전반경 감소 능력을 향상시키기 위한 토크분배 알고리즘을 소개하고, 시뮬레이션을 통하여 알고리즘을 검증한다.

1.2 전 차륜 조향 시스템

길이가 길고 회전 관절로 인하여 차량의 자유도가 높은 굴절차량은 회전 반경이 크고 차량의 제어가 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 앞에서 제시한 KRR의 바이모달 트램과 APTS의 Phileas 굴절차량은 전 차륜 조향 시스템을 적용하였다[1]. 전 차륜 조향 시스템의 전자 제어 장치는 차량의 주행 속도, 굴절 각도, 1차 축의 조향 각도 정보를 통하여 2차 축과 3차 축의 조향 값을 계산하고 변경한다. 전 차륜 조향 시스템을 통하여 작은 최소반경을 가질 수 있을 뿐 아니라, 차량 후부를 제어하는 등 굴절차량의 자세 제어에 용이하다. Kyeong-Ho Moon [4] 등은 가상 고정 축을 이용한 전 차륜 조향 알고리즘을 소개 하였다.

1.3 독립 구동 파워트레인

위에서 제시된 굴절차량들은 각 바퀴에 한 개의 모터를 가지고 있는 독립 구동 파워트레인을 적용하였다. 이는 기존의 일반 엔진 차량의 구동원부터 바퀴까지 구동력을 전달하는 파워트레인을 제거하여 부품을 줄이고 승객 공간을 최대화할 수 있다[5,6]. 파워트레인의 간단화를 통하여 구동 손실을 줄이고 효율을 높일 수 있는 효과가 있다. 또한 기존의 차량에서 구동력이 차동장치를 통하여 각 바퀴에 수동적으로 분배된 것과 달리 각 바퀴의 독립 제어를 통하여 능동적으로 토크 분배가 가능하다. 이를 통하여 빠르고 정확하게 차량의 자세를 제어할 수 있어 안전성 향상에 기여가 가능하며, 토크 분배 알고리즘을 통하여 차량의 추가적인 자세 제어가 가능하다.

2. 굴절차량의 제어 요소

굴절차량은 길이가 길고 회전 관절이 존재하기 때문에 회

Fig. 2 Dynamic control element of articulated vehicle

전 시 특성이 일반 차량과 다르다. 굴절차량의 선회 시 고려하여야 하는 인자로는 회전반경, 차량 선회 폭, 이탈궤적, 스윙아웃 등이 있다[7]. Fig. 2는 다양한 굴절차량의 제어 요소들을 나타낸다.

2.1 회전반경(Turning Radius)

회전반경은 차량의 선회 시 최소 회전반경을 나타낸다. 이는 긴 차량의 도로 주행을 위하여 필수적으로 고려되어야 할 요소일 뿐 아니라 굴절차량의 기본적인 목적이기도 하다. 일반 도로를 주행하기 위해서는 유럽 법규 기준 12.5m를 만족해야 한다[7]. Michihisa Iida [8]는 굴절차량에서 브레이크의 독립적인 작동을 통하여 회전반경을 줄이는 방법을 제안하였다.

2.2 차량 선회 폭(Swept Path Width)

차량 선회 폭은 원곡선을 회전할 때 필요한 최소 폭을 나타낸다. 이는 차량의 너비, 축거, 앞 오버행, 뒤 오버행에 따라 결정되며, 일반적으로 이 변수들이 커지면 차량 선회 폭 또한 커지게 된다. 굴절차량은 일반 차량에 비해 차량 선회 폭이 크므로 일반 도로에서 주행하여야 하는 바이모달 트램과 같은 차량에서는 필수적으로 고려되어야 한다.

2.3 이탈궤적(Off-tracking)

이탈궤적은 앞 축의 중심과 뒤 축의 중심의 궤적 차이를 나타낸다. 궤도를 따라 주행하는 굴절차량들은 앞 차륜과 뒤 차륜의 중심 궤적이 일치하지만, 일반 도로를 주행하는 차량들은 뒤 차륜이 안쪽으로 끌려 들어오게 된다. 이 때의 앞 축의 중심과 뒤 축의 중심의 궤적 차이를 이탈궤적이라 한다[7]. Fig. 2와 같은 2량 편성 차량에서는 1축 중심과 3축 중심 궤적의 반경방향 차이가 가장 크며 축거가 길수록 커지게 된다. 이탈궤적을 감소시키기 위하여 C.Altafini [9]는 전륜 조향각의 피드백 제어를 통하여 후륜 조향각을 제어하는 알고리즘을 제안하였다[10].

2.4 스윙아웃(Swing-out)

스윙아웃은 차량의 후부가 후부 축보다 바깥쪽으로 벗어 나려는 현상을 나타낸다. 이는 주로 직선 주행을 하던 차량이 곡선 구간으로 진입하는 순간에 발생한다. 스윙아웃이 커져 옆 차선을 침범할 경우 다른 차량과의 충돌 가능성이 있으므로 이에 따른 제어가 필요하다.

3. 토크 분배 알고리즘

독립 구동 파워트레인 장착에 따른 독립적인 토크 분배 알고리즘을 통하여, 앞에서 제시된 다양한 굴절차량의 제어 요소를 제어할 수 있을 것으로 예상된다. 이 논문에서는 굴절차량의 기본 목표인 회전 성능 향상에 대한 토크 분배 알고리즘을 제시한다.

3.1 굴절차량 모델링

이 논문에서는 KRRI 에서 개발한 바이모달 트램의 차량 사양에 제시된 토크 분배 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 차량 사양은 Fig. 3, Table 1과 같다.

Fig. 3 The KRRI all wheel steered single articulated vehicle [11]

Table 1 The KRRI all wheel steered single articulated vehicle [11]

Capacity	116 Persons	Carriage	2 Carriages
Turning radius	12m	Max. Speed	80km/h
Steer	All-wheel	Length	18m
Width	2.5m	Height	3.38m

각 차량 상태에서의 조향각은 가상 고정 축을 이용한 전차륜 조향 알고리즘을 이용하여 계산하였다[7]. 차량의 회전시에 차량의 각 바퀴가 이동하는 거리는 모두 다르며, 이 때의 토크 기준을 결정하기 위하여 각 바퀴의 회전 반경을 계산하였다. Fig. 4는 굴절차량의 회전 시 회전 능력에 영향을 미치는 요소들을 나타낸다.

$$\tan(\delta_1) = \frac{l-P_1}{v_1} \Rightarrow v_1 = \frac{l-P_1}{\tan(\delta_1)} \quad (1)$$

$$\tan(\delta_3) = \frac{P_2}{v_2} \Rightarrow v_2 = \frac{P_2}{\tan(\delta_3)} \quad (2)$$

식 (1), (2)를 이용하여 각 바퀴의 회전 반경을 계산하면 (1)-(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{w1} = \sqrt{\left(v_1 + \frac{l_w}{2}\right)^2 + (l_1 - P_1)^2} = \sqrt{\left(\frac{l-P_1}{\tan(\delta_1)} + \frac{l_w}{2}\right)^2 + (l_1 - P_1)^2} \quad (3)$$

$$R_{w2} = \sqrt{\left(v_1 - \frac{l_w}{2}\right)^2 + (l_1 - P_1)^2} = \sqrt{\left(\frac{l-P_1}{\tan(\delta_1)} - \frac{l_w}{2}\right)^2 + (l_1 - P_1)^2} \quad (4)$$

$$R_{w3} = \sqrt{\left(v_1 + \frac{l_w}{2}\right)^2 + (P_1)^2} = \sqrt{\left(\frac{l-P_1}{\tan(\delta_1)} + \frac{l_w}{2}\right)^2 + (P_1)^2} \quad (5)$$

Fig. 4 Dynamic model of articulated vehicle

$$R_{w4} = \sqrt{\left(v_1 - \frac{l_w}{2}\right)^2 + (P_1)^2} = \sqrt{\left(\frac{l-P_1}{\tan(\delta_1)} - \frac{l_w}{2}\right)^2 + (P_1)^2} \quad (6)$$

$$R_{w5} = \sqrt{\left(v_2 + \frac{l_w}{2}\right)^2 + (P_2)^2} = \sqrt{\left(\frac{P_2}{\tan(\delta_3)} + \frac{l_w}{2}\right)^2 + (P_2)^2} \quad (7)$$

$$R_{w6} = \sqrt{\left(v_2 - \frac{l_w}{2}\right)^2 + (P_2)^2} = \sqrt{\left(\frac{P_2}{\tan(\delta_3)} - \frac{l_w}{2}\right)^2 + (P_2)^2} \quad (8)$$

각 변수는 R_{w1} , R_{w2} , R_{w3} , R_{w4} , R_{w5} , R_{w6} : 각 바퀴의 회전 반경 길이, v_1 : 1차 축 가상 고정 축 길이, v_2 : 2차 축 가상 고정 축 길이, l_1 : 1차 축과 2차축 축간거리, l_2 : 2차 축과 3차축 축간거리, l_w : 각 축의 윤간거리, δ_1 : 1차 축 조향 각도, δ_2 : 2차 축 조향 각도, δ_3 : 3차 축 조향 각도, α : 굴절 각도이다.

3.2 토크 분배 알고리즘

회전 반경을 줄이기 위하여 각 바퀴에 능동적으로 토크 차이를 주어 추가적인 회전력을 얻고자 한다. 먼저 차량구동에 필요한 토크(T_{total})를 각 구동 축에 분배한 후 좌측 바퀴와 우측 바퀴의 회전반경의 비율로 기준 토크를 설정하였다. 바이모달 트램은 1차 축을 제외한 4개의 바퀴에 각각 모터가 장착되어 있으므로 2차 축의 기준 토크 분배는 (9), (10)과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$T_3 = \frac{T_{total}}{2} \times \frac{R_{w3}}{R_{w3} + R_{w4}} \quad (9)$$

$$T_4 = \frac{T_{total}}{2} \times \frac{R_{w4}}{R_{w3} + R_{w4}} \quad (10)$$

앞에서 계산한 기준 토크에 추가적인 회전력을 얻기 위하여 조향 계수 (TF: Turning Factor)를 이용하여 각 바퀴의 토크 식을 (11), (12)과 같이 계산한다.

이 때 조향 계수가 0인 경우 기준 토크를 발생하도록 설정하였으며, 이 때 조향 계수는 δ_i 가 0보다 큰 경우 (+) 값을, 0보다 작은 경우 (-) 값을 갖는다.

$$T_3 = \frac{T_{total}}{2} \times \frac{R_{w3}}{R_{w3} + R_{w4}} \times (1 + TF) \quad (11)$$

$$T_4 = \frac{T_{total}}{2} \times \frac{R_{w4}}{R_{w3} + R_{w4}} \times (1 - TF) \quad (12)$$

위에서 설정한 식 (9), (10), (11), (12)는 2량 이상의 차량 또는 더 많은 구동 축을 가진 차량에도 동일하게 적용 가능하며, (9), (10)을 2량 이상의 차량 구성에 적용하기 위하여 일반적인 식으로 나타내면 식 (13), (14)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{i(i=1,3,5)} = \frac{T_{total}}{N} \times \frac{R_{wi}}{R_{wi} + R_{wi+1}} \quad (13)$$

$$T_{i+1(i=1,3,5)} = \frac{T_{total}}{N} \times \frac{R_{wi}}{R_{wi} + R_{wi+1}} \quad (14)$$

조향 계수를 적용한 식 (11), (12)을 2량 이상의 차량구성에 적용하기 위하여 일반적인 식으로 나타내면 식 (15), (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{i(i=1,3,5)} = \frac{T_{total}}{N} \times \frac{R_{wi}}{R_{wi} + R_{wi+1}} \times (1 - TF) \quad (15)$$

$$T_{i+1(i=1,3,5)} = \frac{T_{total}}{N} \times \frac{R_{wi+1}}{R_{wi} + R_{wi+1}} \times (1 + TF) \quad (16)$$

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 조건

회전 반경 측정을 위한 시뮬레이션 조건으로 입력한 차량과 타이어의 조건은 바이모달 트램과 동일하며 Table 2과 같다. 시뮬레이션은 TruckSim® Matlab/Simulink® 사용하여 수행하였다. 일정한 실험 조건을 위하여 1차 축의 좌 우 평균 조향 각도는 최대 조향 각도인 32.2deg로 설정하였고, 차량 속도는 20km/h로 Kyeong-Ho Moon [4]에서의 시뮬레이션 조건과 동일하게 설정하였다.

일반 회전 조건인 조향 계수(TF)가 0인 경우부터, 조향 계수를 1.0, 1.5, 2.0로 변경하며 네 가지 조건에서 차량의 회전반경을 비교하였다. 모터의 토크 한계로 인하여 일반적인 상황에서 모터가 일반 구동 토크의 2배 이상의 토크를 발생할 수 없어 조향 계수를 2.0까지로 한정하였다.

4.2 시뮬레이션 결과

위의 시뮬레이션 조건에서 Vehicle Motion, Yaw rate,

Table 2 Parameters of vehicle used for simulation [1,11]

Parameters		Value
Articulated Vehicle		
Mass	Carriage 1	9289kg
	Carriage 2	9676kg
Moment of inertia	Carriage 1	98502kg·m ²
	Carriage 2	44550kg·m ²
Motor: 3Phase, 6Poles AC Induction		
Rated power		45KW
Voltage/Current		480V 80A
Torque		146Nm
Gearbox: 2 step with helical gears		
Gear ratio		14.42:1
Simulation condition		
Road friction coefficient		0.85
Steering angle		32.2deg
Vehicle speed		20km/h

Body slip angle을 측정하였다. Vehicle Motion은 차량의 이동 경로를 나타낸 것이며, Yaw rate는 차량 무게중심에서 측정한 z-방향 각속도로 차체의 회전 속도를 나타낸다. Body slip angle은 차륜의 중심선과 차륜의 주행 방향이 만드는 각을 의미하며, 차량은 기존 주행 방향에서 차륜의 중심선 방향으로 주행하게 되므로, Body slip angle이 클수록 회전 효과가 크다고 할 수 있다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7과 같다.

조향 계수를 0으로 한 경우 제한된 토크 분배 알고리즘을 적용하지 않고, 전 차륜 조향 시스템만 적용된 값으로 Kyeong-Ho Moon [4]과 동일한 결과를 갖는 것을 확인할 수 있다. 조향 계수를 변경해가면서 시뮬레이션을 한 결과 조향 계수를 크게 할수록 회전반경이 줄어드는 것을 알 수 있다. Fig. 5와 같이 조향 계수를 0으로 설정한 경우 10.65m

Fig. 5. Vehicle motion with circle driving simulation result

Fig. 6 Yaw rate with circle driving simulation result

Fig. 7 Body slip angle with circle driving simulation result.

의 회전 반경을 가지는 것을 확인하였고, 조향 계수를 2.0으로 설정한 경우 9.78m의 회전 반경을 가지는 것을 확인하였다. 이는 20km/h에서 차량의 조향 각을 일정하게 유지한 채 토크의 분배만으로 회전 반경을 8.17% 줄일 수 있는 것을 나타낸다. 마찬가지로 Fig. 6과 Fig. 7에서 차량의 중심에서 측정된 Yaw rate와 Body Slip Angle 모두 조향 계수를 크게 할수록 커지는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

이 논문에서는 굴절차량의 모델링을 통하여 굴절차량의 기준 토크를 계산하고, 조향 계수의 적용을 통하여 추가적인 회전력을 발생하여 회전반경을 줄일 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 또한 제안된 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 실제 제작된 굴절차량과 동일한 조건으로 차량을 모델링하고, 각 조향 계수를 변경해 가며 회전 반경을 측정하였다. 시뮬레이션 결과 조향 계수를 크게 할수록 차량의 회전반경

이 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 최대 조향을 한 상태에서 20km/h의 속도로 시뮬레이션 한 결과 기준 토크(조향 계수: 0, 전 차량 조향 적용: Kyeong-Ho Moon [4])를 적용하였을 때에 비하여 조향 계수를 2.0으로 설정하였을 때 최소 회전 반경이 8.17% 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

또한 제안된 알고리즘을 사용하면서 안정적으로 원 주행을 하는 것을 확인할 수 있었다. 토크 분배 알고리즘을 통하여 축소된 회전반경 8.17% (0.87m)는 바이모달 트램의 더 좁은 도로의 주행을 가능하게 할 뿐 아니라 주변 다른 차량의 운행에 방해줄 줄일 수 있다. 또한 이를 통하여 바이모달 트램의 주행을 위하여 필요한 전용도로의 폭과 일반 도로에서의 주행을 위한 도로 확폭을 축소할 수 있다. 추후 독립 구동 굴절차량의 토크 분배 방식을 통하여 이탈제적, 스윙아웃 현상을 제어하는 알고리즘의 연구 또한 필요하다.

후 기

본 연구는 국토교통부 철도특성화대학원 지원사업에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] S. Leem, S. Choi (2010) The introduction of bimodal tram system, *Daewoo Engineering Technology magazine*, 26(1), pp. 54-69.
- [2] Y. Kim, K. Yun, K. Min, Y. Byun, J. M (2007) A lateral dynamic model of an all wheel steering bimodal vehicle, *International Conference on Control, Automation and Systems*, Seoul, Korea, pp. 1734-1737.
- [3] Y. byun, M. Kim, J. Mok, Y. Kim (2008) Longitudinal control of bimodal-tram using sliding mode control, *International Conference on Control, Automation and Systems*, Seoul, Korea, pp. 1439-1442.
- [4] K. Moon, S. Lee, J. Mok, T. Park (2008) Development and verification of the steering algorithm for articulated vehicles, *Journal of the Korean Society for Railway*, 11(3), pp. 225-232.
- [5] S. Murata (2012) Innovation by in-wheel-motor drive unit, *Vehicle System Dynamics*, 50(6), pp. 807-830.
- [6] K. Kim, K. Shin, Y. Kim, J. Cheon (2010) Integrated design of in-wheel motor system on rear wheels for small electric vehicle, *World Electric Vehicle Journal*, 4, pp. 597-602.
- [7] K. Moon, S. Chang, J. Mok (2011) A Study on the swept path width for the bimodal tram, *Proceedings Autumn of the Korean Society for Railway*, Korea, pp. 51-56.
- [8] M. Iida, H. Nakashima, H. Tomiyama, T. Oh, T. Nakamura (2011) Small-radius turning performance of an articulated vehicle by direct yaw moment control, *Computers and Electronics in Agriculture*, 76, pp. 277-283.
- [9] C. Altafini (2003) Path following with reduced off-tracking for multibody wheeled vehicles, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 11(4), pp. 598-605.

- [10] S. Choi, T. Park, S. Lee, K. Moon (2009) A study on developing reverse parking assistant algorithm for bi-modal tram, *Transactions of KSAE*, 17(5), pp. 84-90.
- [11] Y. Kim, K. Min, K. Yun, Y. Byun, J. Mok (2008) Steering control for lateral guidance of an all wheel steered vehicle, *International Conference on Control, Automation and Systems*, Seoul, Korea, pp. 24-28.

접수일(2014년 6월 27일), 수정일(2014년 8월 26일),
게재확정일(2014년 9월 22일)

Kibeom Lee : kibeom.lee@kaist.ac.kr
The CCS Graduate School for Green Transportation, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

Karam Hwang : hwang8@kaist.ac.kr
The CCS Graduate School for Green Transportation, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

Junyoung Tak : jy.tak@kaist.ac.kr
The CCS Graduate School for Green Transportation, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

In-Soo Suh : insoo.suh@kaist.ac.kr
The CCS Graduate School for Green Transportation, KAIST, Daejeon 305-701, Korea